

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Součinitel místních ztrát různých tvarovek

Local Loss Coefficient of Various Hydraulic Elements

Student:

Bc. Filip Bušo

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Daniel Himr, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Filip Bušo**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Součinitel místních ztrát různých tvarovek**
Local Loss Coefficient of Various Hydraulic Elements

Zásady pro vypracování:

Vpracujte obecnou literární rešerši místních ztrát (základní rozdělení, mechanismus energetických ztrát, způsoby zjišťování, výpočtu,...), zvláštní péči věnujte části o kolenech a rozvětvení.
Proveďte měření ztrátového součinitele vybraných hydraulických prvků na zkušební trati v laboratoři Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení.
Vypracujte matematický algoritmus pro stanovení ztrátového součinitele z geometrie vybraného hydraulického prvku.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] IDELCHIK, I., E.: *Handbook of Hydraulic Resistance*. CRC Press, Inc. 1994. ISBN 1-56700-074-6.
- [2] IDELCHIK, I., E.: *Spravočnik po gidravličeskim soprotivlenijam*. Mašinostroje 1975, Moskva.

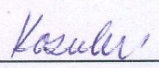
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Daniel Himr, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013




prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ...20 května 2013.....



.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užívat dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě20 května 2013.....



.....
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Filip Bušo

Adresa trvalého pobytu autora práce: Rumunská 11, 779 00 Olomouc

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

BUŠO, F. Součinitel místních ztrát různých tvarovek : bakalářská práce. Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2013, 40 s. Vedoucí práce: Himr, D.

Tato bakalářská práce obsahuje obecné rozdělení hydraulických odporů a způsoby jejich výpočtu. Konkrétně se věnuje místním ztrátám na jednotlivých hydraulických prvcích. Popisuje, jak se v těchto prvcích chová proudění kapaliny a jakým způsobem můžeme zjistit ztrátový součinitel.

Klíčová slova: proudění; tlak; ztrátový součinitel

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

BUŠO, F. Local Loss Coefficient of Various Hydraulic Elements : Bachelor Thesis. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation, 2013, 40 s. Thesis head: Himr, D.

This thesis contains a general distribution of hydraulic resistance and methods of calculation. Specifically, dedicated local losses of hydraulic elements. Describes how these elements acting fluid flow and how it can detect loss coefficient.

Key words: convection; pressure; loss coefficient

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam použitých symbolů | 7 |
| Úvod | 8 |
| 1 Hydraulické odpory | 9 |
| 1.1 Třecí odpory | 9 |
| 1.2 Místní odpory | 13 |
| 2 Měření ztrátového součinitele v koleni | 26 |
| 2.1 Popis měřicího obvodu a princip jeho funkce | 26 |
| 2.2 Postup měření a výpočtu | 27 |
| 2.3 Vyhodnocení měření | 30 |
| Závěr | 31 |
| Seznam použité literatury | 32 |
| Seznam obrázků | 33 |

Seznam použitých symbolů

| | | |
|---------------|----------------------------------|------------------------------------|
| d | průměr potrubí | [m] |
| Re | Reynoldsovo číslo | [-] |
| λ | třecí součinitel | [-] |
| K | střední hodnota drsnosti potrubí | [m] |
| ζ | ztrátový součinitel | [-] |
| v | rychlost proudění | [m.s ⁻¹] |
| ν | kinematická viskozita | [-] |
| e_z | ztrátová měrná energie | [J.kg ⁻¹] |
| h_z | ztrátová výška | [m] |
| ε | poměrná drsnost povrchu | [-] |
| l_e | ekvivalentní délka | [m] |
| p_z | tlaková ztráta | [Pa] |
| Δh_c | ztrátová výška na cloně | [mm] |
| Δh_p | ztrátová výška na prvku | [mm] |
| Q_v | objemový průtok | [m ³ .h ⁻¹] |
| S | průřez potrubí | [m ²] |

Úvod

Tato práce je zpracována na téma Součinitel místních ztrát různých tvarovek a je vypracována na dvě části. První část se věnuje rozdělení hydraulických odporů na odpory místní a třecí a popisuje postup jejich výpočtu. Práce vysvětluje princip vzniku místních ztrát a postup měření a vyhodnocení ztrátového součinitele v obecném hydraulickém prvku. Dále v ní najdeme vypracovanou obecnou literární rešerši místních ztrát v hydraulických prvcích, jejich základní rozdělení, popisuje mechanismus energetických ztrát, způsoby zjišťování a výpočtu. Zvláště se práce zaměřuje na kolena a rozvětvení.

V druhé části se práce zabývá proměření ztrátového součinitele hydraulického prvku, popisem samotného měření a veličin potřebných pro výpočet ztrátového součinitele a nakonec vyhodnocením celého měření.

1 Hydraulické odpory

Hydraulický odpor je síla, která působí proti směru proudu tekutiny. Tuto sílu v tekutině způsobují turbulence. Turbulence v tekutině můžou vzniknout v tenké vrstvě na povrchu potrubí, v tzv. mezní vrstvě. Pak hydraulický odpor nazýváme třecím odporem. Druhým způsobem, kde může turbulence vzniknout, je v místě, kde potrubí, a tedy i tekutina, mění svůj směr či průřez. Tento typ odporů nazýváme místní odpory. Velikost těchto odporů vyjadřujeme pomocí ztrátových součinitelů ζ , tedy ztrátový součinitel třecích odporů ζ_t a ztrátový součinitel místních odporů ζ_m . Vztahy pro výpočet ztrát jsou popsány v jednotlivých kapitolách (1.1 a 1.2).

1.1 Třecí odpory

Třecí odpor vzniká v mezní vrstvě, kde tekutina proudí po povrchu potrubí a musí překonávat jeho nerovnosti. Velikost mezní vrstvy a tedy i třecího odporu je závislá na velikosti nerovností. Čím jsou nerovnosti větší, tím je větší i mezní vrstva a s ní i třecí odpor. Třecí odpory jsou rovněž závislé na délce potrubí. Ztrátový součinitel třecích odporů je přímo úměrný délce potrubí L .

Pro výpočet ztrátového součinitele musíme nejprve rozlišit, o jaký druh proudění v potrubí se jedná. Typ proudění zjišťujeme, pomocí Reynoldsova čísla Re [-]. Reynoldsovo číslo je bezrozměrná veličina, která nám udává vztah mezi odporem prostředí a vnitřním třením tekutiny. Čím je Reynoldsovo číslo vyšší, tím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor. K výpočtu Reynoldsova čísla používáme rovnici (1).

$$Re = \frac{\rho \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

Proudění máme laminární a turbulentní. Přejít mezi laminárním a turbulentním prouděním nám udává kritická hodnota Reynoldsova čísla. Tato hodnota se mění podle druhu tekutiny a typu potrubí a zjišťuje se experimentálně. Kritická hodnota se obvykle pohybuje kolem hodnoty 2000. Například pro proudění vody v uzavřených profilech je kritická hodnota $Re_k = 2320$. Tedy pokud je $Re \leq 2320$ označujeme proudění za laminární a pokud je $Re > 2320$ proudění je turbulentní. Proudění se však nezmění jen tak z ničeho nic a udává se, že v intervalu $2320 < Re < 4000$ je tzv. přechodová oblast, kde se mění laminární proudění v turbulentní.

Laminární proudění

Proudění nazýváme laminární, jestliže se jeho částice pohybují uspořádaným pohybem v tenkých vrstvách, aniž by se přemísťovali po průřezu. Laminární proudění se nachází v oblasti $Re \leq 2320$. Pro oblast laminárního proudění v kruhovém potrubí vypočteme třecí součinitel pomocí vzorce (2). Ten však platí pouze pro vyvinutý rychlostní profil a newtonovské tekutiny. Při nerovnoměrném rychlostním profilu, který je způsoben například vyšší mezní vrstvou a tím větším třecím odporem, používáme vztah (3), kde $A=70$ až 85 , potom je kritické Reynoldsovo číslo $Re_K=1600$ [-].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{A}{Re} \quad (3)$$

Po zjištění třecího součinitele můžeme vypočítat ztrátový součinitel podle rovnice (4), popřípadě ztrátovou výšku z rovnice (5) nebo tlakové ztráty z rovnice (6).

$$\zeta = \lambda \frac{L}{d} \quad (4)$$

$$h_z = \frac{p_z}{\rho \cdot g} = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

$$p_z = \lambda \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (6)$$

Turbulentní proudění

Proudění nazýváme turbulentní, jestliže se jeho částice chaoticky pohybují jak v prostoru, tak i v čase. Turbulentní proudění se nachází v oblasti $Re > 2320$. U turbulentního proudění je tečné napětí větší, a proto jsou ztráty třením větší než u laminárního proudění. Rovněž musíme nejprve vypočítat součinitel tření. Ten vypočteme pomocí experimentálně zjištěných vztahů podle různých autorů z rovnic (7), (8), (9), (10), (11).

Blasius:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (7)$$

Altšul:

$$\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re} + \frac{k}{d} \right)^{0,25} \quad (8)$$

Nikuradse:

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda} \right) - 1,8 \right]^2} \quad (9)$$

Colebrook:

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(\frac{2,51}{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}} \right) + 1,27 \cdot \frac{k}{d} \right]^2} \quad (10)$$

Churchill:

$$\lambda = 8 \cdot \sqrt[12]{\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{\sqrt{(A+B)^3}}}$$

$$A = \left\{ -2,457 \cdot \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \cdot \frac{k}{d}} \right] \right\}^{16} \quad (11)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16}$$

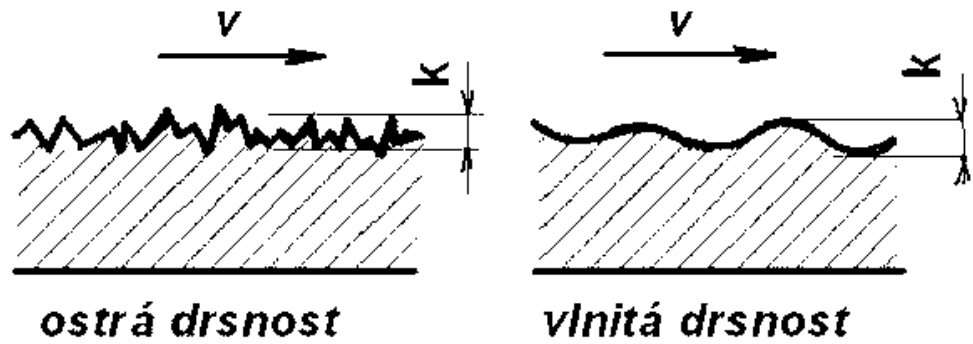
Při výpočtu ztrát musíme brát ohled na drsnost povrchu v potrubí, která velmi ovlivňuje proudění. Vliv drsnosti na součinitel tření v potrubí nám turbulentní proudění rozděluje na tři oblasti:

1. Hydraulicky hladké potrubí – vazká podvrstva zakryje drobné nerovnosti povrchu, které potom nemají vliv na proudění a potrubí se jeví jako hydraulicky hladké.

2. Přejížděvací oblast – v ní nerovnosti povrchu začínají vyčnívat z vazké podvrstvy a součinitel tření začíná být závislý nejen na Reynoldsově čísle, ale i na poměrné drsnosti povrchu ε .

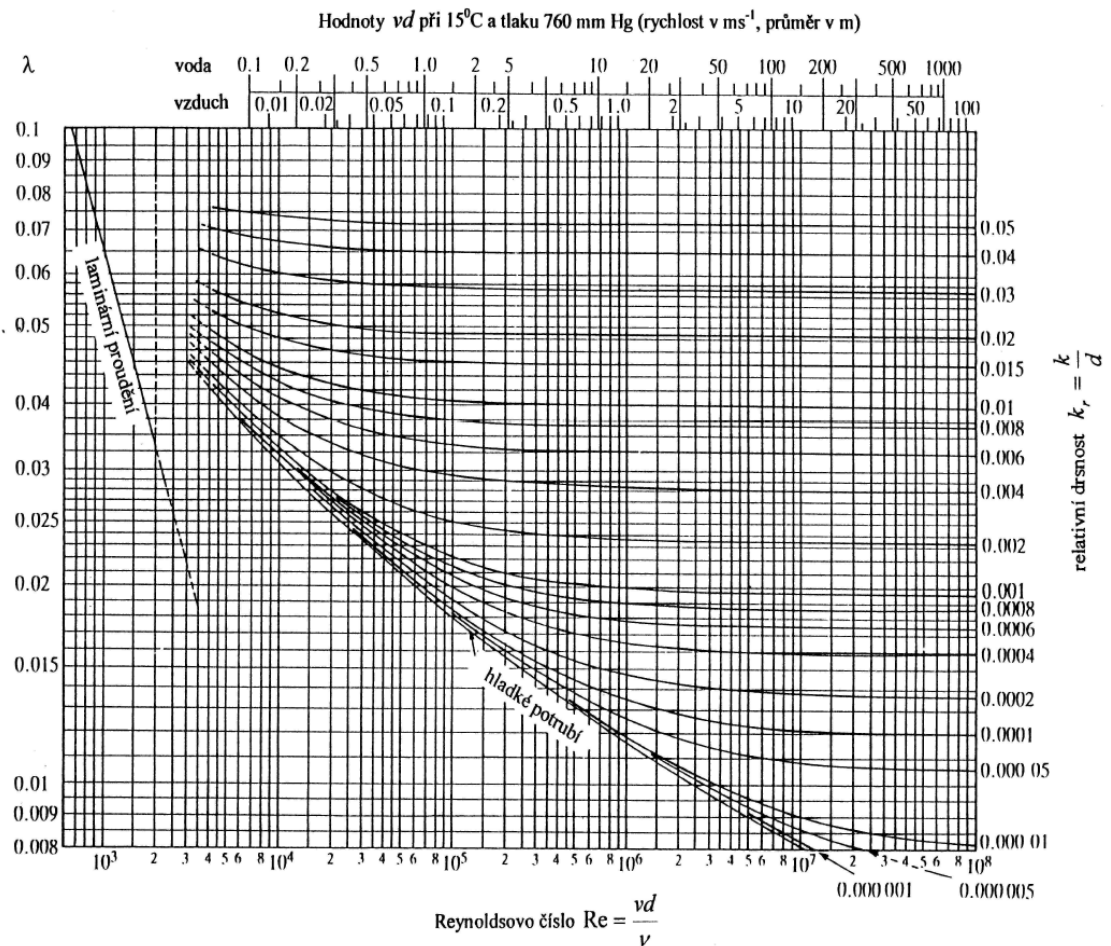
3. Vyvinuté turbulentní proudění – nerovnosti povrchu vyčnívají z laminární podvrstvy a součinitel tření je závislý na poměrné drsnosti povrchu ε .

Nejen velikost nerovností, ale i jejich tvar má vliv na třecí součinitel, a proto se drsnost rozděluje na drsnost způsobenou ostrými a krátkými výstupky, nazýváme ji ostrá drsnost, a na drsnost způsobenou zaoblenými nerovnostmi, tu nazýváme vlnitou drsností.



Obrázek 1 - Rozdělení drsností [2]

Závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle a drsnosti povrchu zkoumal německý inženýr Johann Nikuradse. Ten pracoval s tříděným pískem (podle velikosti zrn), který nalepoval na stěny potrubí a sledoval chování proudění při různých rychlostech. Výsledek zpracoval do grafu na obrázku Obrázek 2.



Obrázek 2 - Nikuradseho diagram [5]

1.2 Místní odpory

V každém potrubí bývají kromě rovných úseků i různá zakřivení, odbočky, filtrační soustavy, měřicí zařízení apod. anebo se může měnit průřez potrubí. V těchto místech dochází ke změně velikosti i směru rychlosti proudění, což způsobuje vznik turbulencí. Ztrátový součinitel závisí na konstrukčních parametrech, drsnosti stěn a režimu proudění.

Velikost místních ztrát se vyjadřuje pomocí rychlostní výšky, jak ukazuje rovnice (12) nebo měrnou ztrátovou energií, podle rovnice (13).

$$h_{zm} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (12)$$

$$e_z = \zeta \cdot h_z = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \quad (13)$$

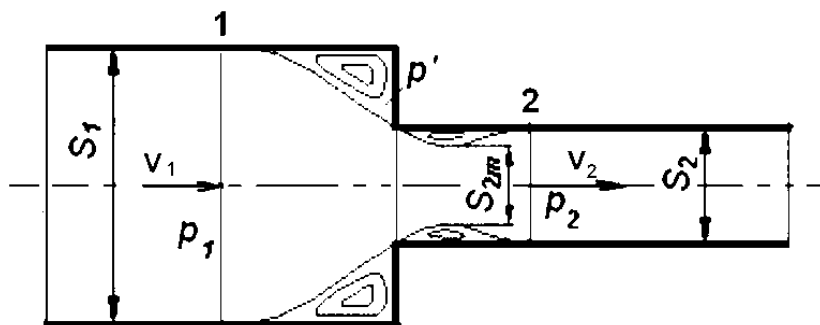
Můžeme ji také vyjádřit také ekvivalentní délkou potrubí l_e , v němž je ztráta třením stejná jako místní ztráty. Výpočet vychází z rovnosti ztrátových výšek v rovnici (14).

$$\zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (14)$$

$$l_e = \frac{\zeta}{\lambda} \cdot d$$

Ztráta náhlým zúžením

V místech, kde kapalina náhle zmenšuje svůj průřez, se zvyšuje její rychlost a snižuje se její statický tlak. Vlivem setrvačnosti nemůže kapalina plynule sledovat tvar potrubí a vytvoří se víry v ostrých rozích. Tato situace je zobrazena na obrázku 3.



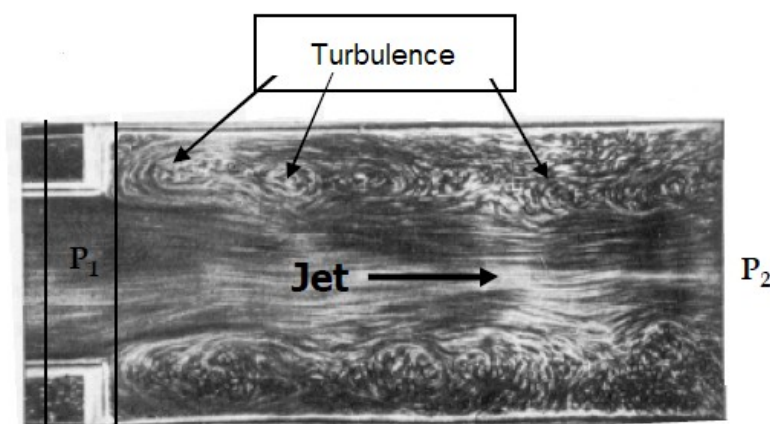
Obrázek 3 – Zúžení průřezu potrubí [2]

Tlakové ztráty v zúžení jsou způsobeny náhlou změnou průřezu a také turbulencí, která je se změnou průřezu spjata. Velikost tlakové ztráty lze vypočítat podle vzorce (15). Výpočet vychází ze znalostí velikostí průřezů před a za zúžením.

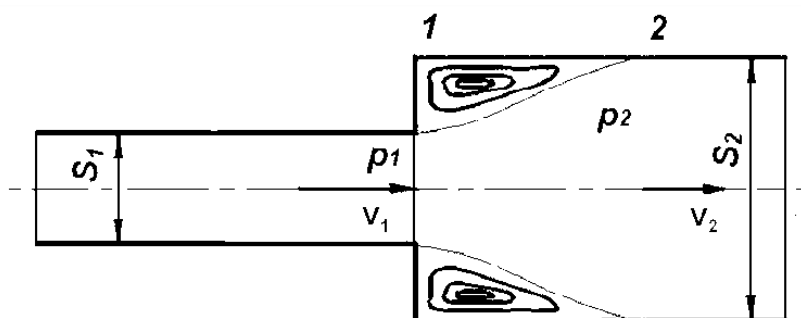
$$\zeta_1 = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \frac{S_1}{S_2} \quad (15)$$

Ztráta náhlým rozšířením

Při náhlém rozšíření průřezu se odtrhne proud kapaliny od stěny a vytvoří se vír, jak nám ukazuje Obrázek 4. Jak kapalina zaujímá širší průřez, střední rychlost proudění se snižuje. Se snižující se střední rychlostí se zvyšuje tlak kapaliny.

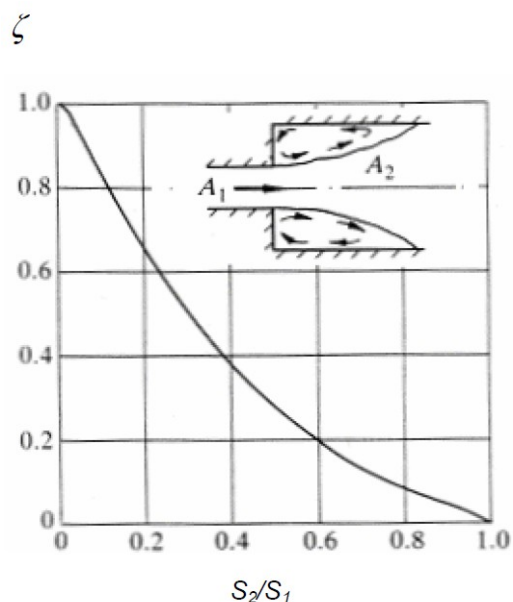


Obrázek 4 - Turbulence za rozšířením [1]



Obrázek 5 - Rozšíření průřezu potrubí [2]

Náhlé rozšíření je doprovázeno velmi znatelnou místní tlakovou ztrátou. Velikost tlakové ztráty se zjišťuje buď experimentálně na jednotlivých prvcích zvlášť, nebo pomocí grafu na obrázku 6, popřípadě výpočtem pomocí rovnice (16). Pro zjištění ztrátového součinitele musíme znát podíl velikostí ploch před a za prouděním, jak je popsáno na ose X.



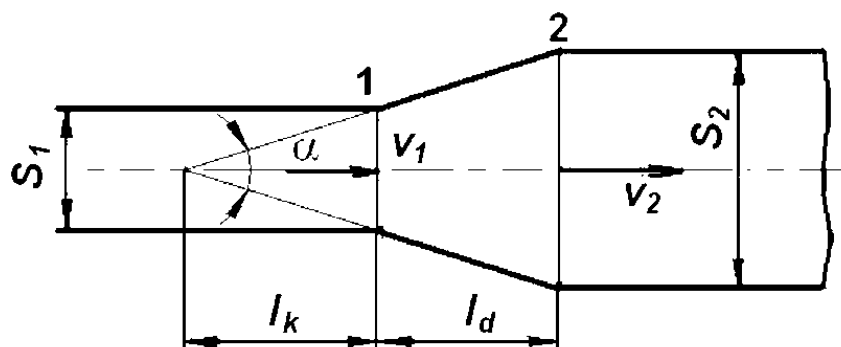
Obrázek 6 – Ztrátový součinitel v náhlém rozšíření[5]

Vzorec pro výpočet tlakové ztráty v náhlém rozšíření je zde uveden po úpravě a vychází z Bernoulliho rovnice a rovnice kontinuity. Stejně jako graf, tak i rovnice vychází ze znalosti velikosti ploch před a za rozšířením.

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2\right]^2 \quad (16)$$

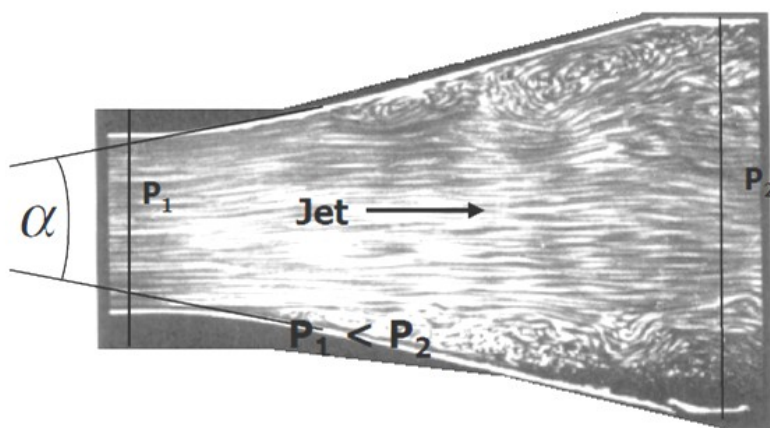
Ztráta v difuzoru

Difuzor se používá v místech, kde je potřeba snížit kinetickou energii, čímž se s minimálními ztrátami zvýší energie tlaková. Na rozdíl od náhlého rozšíření, kde se proud odtrhne od stěny potrubí a tím vytvoří tlakovou ztrátu, u difuzoru se průřez potrubí mění pozvolna, čímž nedochází k tak znatelným tlakovým ztrátám.



Obrázek 7 – Difuzor [2]

Velikost ztrát v tomto prku je závislá na úhlu rozšíření. Při úhlu rozevření $\alpha=6^\circ$ až 8° se proud od stěny neodtrhne a rychlostní profil zůstává symetricky protažený k ose difuzoru. Zvětšování úhlu rozevření na hodnoty $\alpha=10^\circ$ až 50° se proud začne odtrhávat od stěny potrubí. Odtržení proudu nastává zpravidla na jedné straně a to na té, kde je rychlost proudění nižší. Tím se stane rychlostní profil nesymetrický. Tato nesouměrnost je doprovázena nestabilním odtrháváním což způsobí pulsace proudu. Pokud se úhel rozšíření zvětší až na hodnoty $\alpha=50^\circ$ až 60° proud tekutiny již nesleduje stěny difuzoru a odtrhává se po celém průřezu. Tento jev je zobrazen na Obrázek 8. Odtrhávání proudu má za následek zvýšení turbulencí, což způsobí zvýšení tlakových ztrát. Rovněž pulzace, které doprovází odtrhávání proudu, mají za následek zvýšení tlakových ztrát.



Obrázek 8 - Proudění v difuzoru [1]

V difuzoru se projevuje i tlaková ztráta třením kapaliny o stěny potrubí, proto lze celkovou tlakovou ztrátu rozepsat podle rovnice (17) jako součet ztrátové výšky vlivem tření a ztrátové výšky vlivem rozšíření.

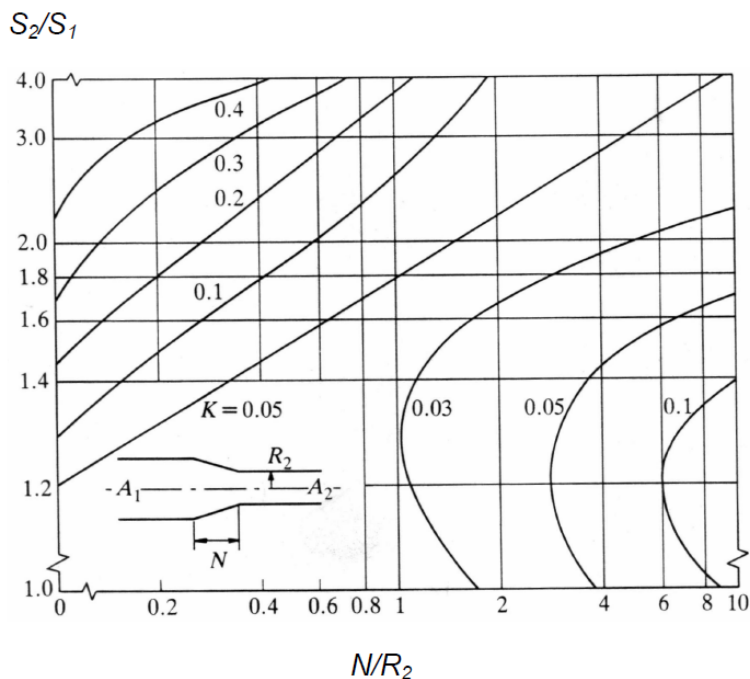
$$h_{zd} = h_{zt} + h_{zr} \quad (17)$$

Celkovou tlakovou ztrátu lze zjistit experimentálně, z grafu na Obrázek 9, anebo pomocí rovnice (19). Výpočet v této rovnici vychází ze znalosti ploch před a za rozšířením a také z tzv. stupně rázu ζ_r . Stupeň rázu je podíl mezi ztrátovou výškou v difuzoru a ztrátovou výškou v náhlém rozšíření. Tento podíl nám ukazuje rovnice (18).

$$\zeta_r = \frac{h_{zd}}{h_{zn}} = \frac{h_{zd}}{\frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}} \quad (18)$$

$$\zeta_{d1} = 2 - \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^2 - \left(\frac{S_2}{S_1} \right)^2 + \zeta_{d2} = \left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right)^2 \zeta_r \quad (19)$$

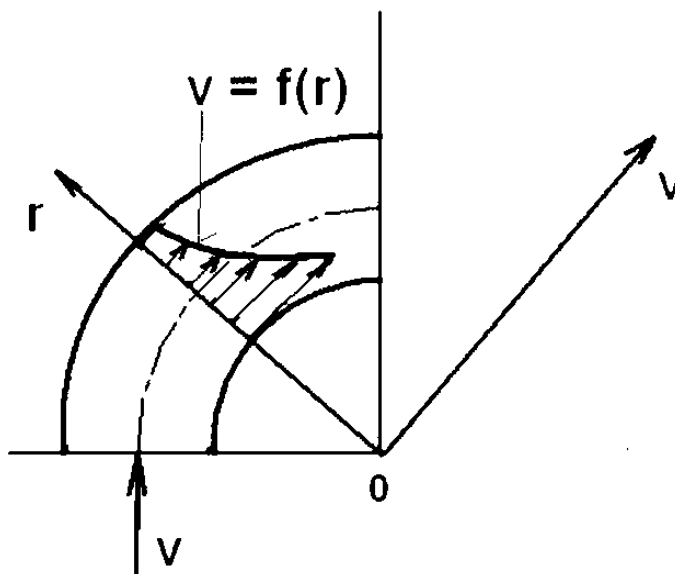
Tlakovou ztrátu v difuzoru můžeme také zjistit z grafu na Obrázek 9. Abychom ji však mohli z grafu vyčíst, musíme znát poměr ploch před a za difuzorem (popsáno na ose Y) a podíl délky zúžení a poloměrem potrubí v zúžené části (popsáno na ose X).



Obrázek 9 – Ztrátový součinitel v difuzoru[5]

Ztráta v koleni

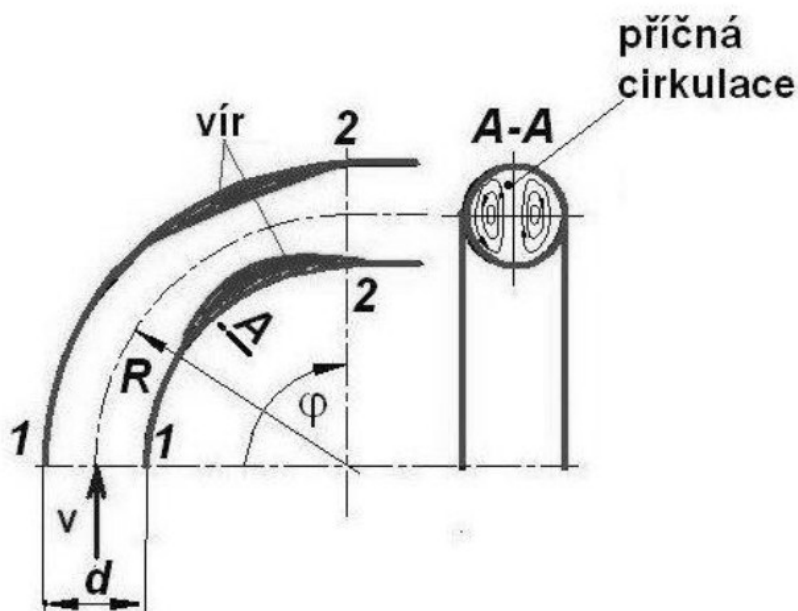
Většinou v každém potrubí se nachází prvek, kde proud kapaliny mění svůj směr. V těchto místech dochází k rozptylu energie vyjádřenou místní ztrátou.



Obrázek 10 – Rychlostní profil v koleni [2]

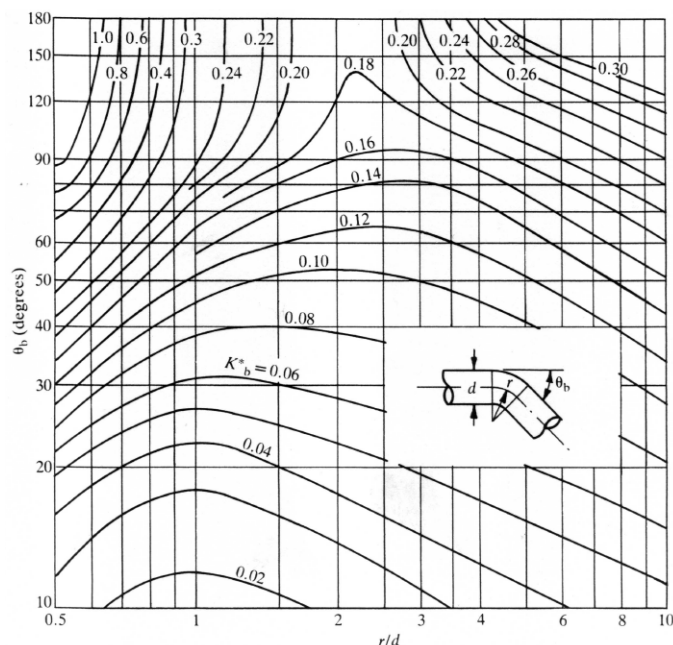
Pro pochopení chování proudění uvažujme dokonalou kapalinu, která vtéká do kolena s konstantní rychlostí po celém průřezu rovnoměrně. Jak potrubí mění svůj směr, tekutina začíná narážet na vnější stranu kolena, čímž snižuje svoji rychlost a zvyšuje tlakovou sílu působící na vnější stěnu zakřivení. Výsledkem je rychlostní profil ve tvaru rovnoosé hyperboly, jak je znázorněno na obrázku 10.

Při uvažování skutečné kapaliny je její chování poněkud složitější, protože vzniká tzv. příčná cirkulace. K té dochází vlivem nestejnoměrné rychlosti částic, kdy částice pomalejší brzdí částice rychlejší a zároveň se částice přemísťují po průřezu. Výsledkem je složitý prostorový pohyb připomínající spirálu. Součástí tohoto vířivého proudění je i proudění v příčném průřezu. Proud vytváří dva víry opačného směru. Pohyb skutečné kapaliny je znázorněn na obrázku 11.



Obrázek 11 - Proudění v kolenu [2]

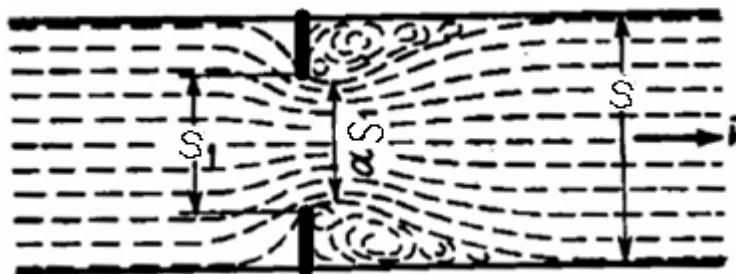
Ztrátu v kolenu lze zjistit experimentálně měřením, jak je popsáno v kapitole 2.2, anebo pomocí grafu na Obrázek 12. Z tohoto obrázku je patrné, že ztrátový součinitel je závislý na poměru mezi poloměrem zaoblení potrubí a jeho průměru a na úhlu, pod kterým je potrubí zahnuto. Zjištění ztrátového součinitele pomocí grafu je rovněž popsáno v kapitole 2.2.



Obrázek 12 – Ztrátový součinitel při proudění v koleni [5]

Ztráta na cloně

Clona je kovová deska s otvorem vložená do potrubí mezi dvě příruby. Otvor má tvar kruhu a jeho průměr se liší podle druhu proudícího média. Clona velice výrazně škrtí průtok a do obvodu se vkládá za účelem měření průtoku.

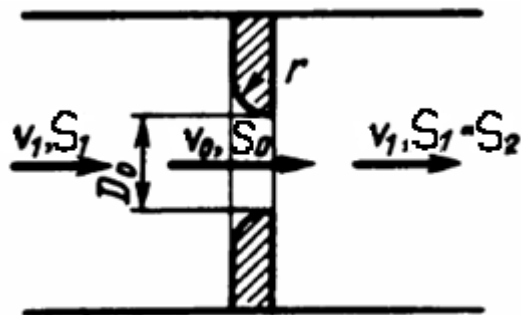


Obrázek 13 – Proudění na cloně [1]

Princip měření průtoku na cloně je založen na snímání statického tlaku před a za clonou. Poté tyto tlaky od sebe odečteme a zjištěný rozdíl dosadíme do rovnice (20).

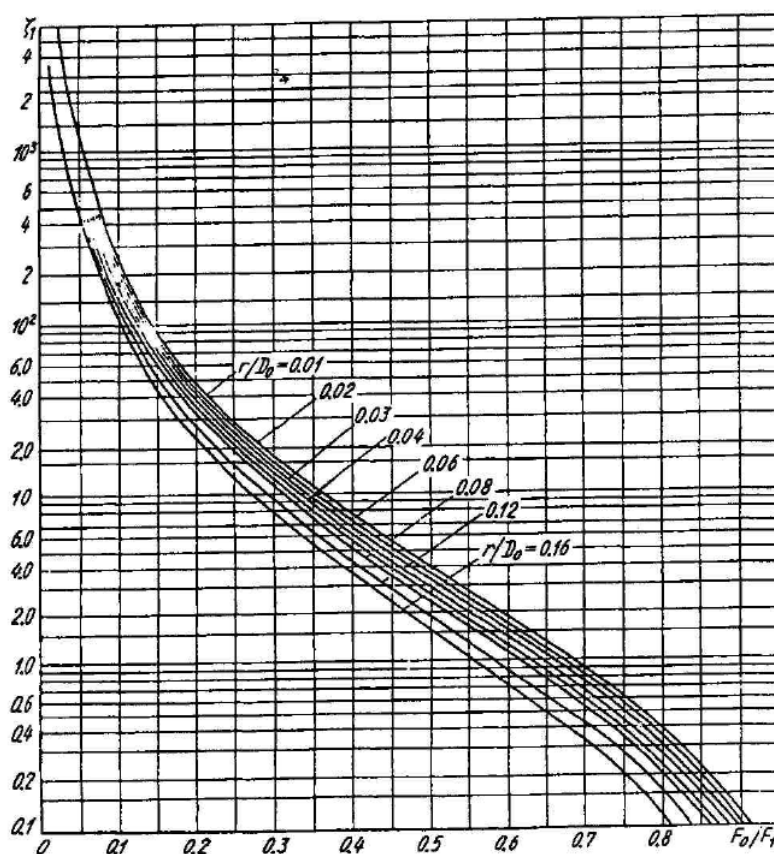
$$v = k \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (20)$$

Tlaková ztráta na cloně vzniká náhlou změnou průřezu a s tím spojenou turbulencí. Velikost ztráty závisí na tvaru clony a její velikosti. Pokud bude například clona na přední straně zaoblená, jak ukazuje obrázek 14, tlaková ztráta se vypočte podle vzorce (21), anebo odečte z grafu na obrázku 15.



Obrázek 14 – Zaoblená clona [1]

$$\zeta_1 \equiv \frac{\Delta p}{\rho w_1^2 / 2} \quad (21)$$



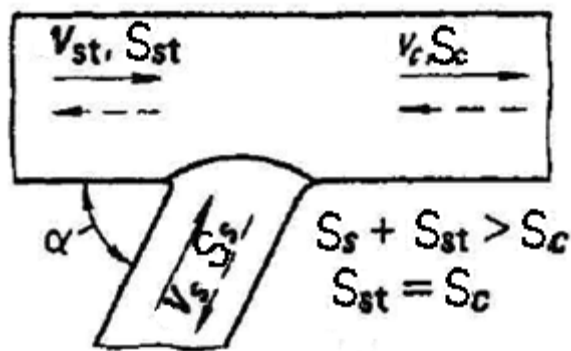
Obrázek 15 – Graf ztrát na cloně [1]

Pro zjištění ztrátového součinitele musíme znát podíl mezi poloměrem zaoblení r a průměrem otvoru v cloně. Obdobně bychom zjistili ztrátový součinitel u ostatních clon, které mají jiný tvar.

Tlakové ztráty v rozvětvení

Rozvětvení slouží v obvodu k dělení nebo naopak spojování proudu kapaliny. Obě tyto změny v proudění kapaliny se projevují tlakovými ztrátami. Tyto ztráty jsou způsobeny snahou kapaliny vyrovnat svoji rychlost po celém průřezu potrubí, což způsobuje turbulence. Velikost tlakových ztrát závisí na úhlu mezi větvemi, na podílu rychlostí přitékající a vytékající kapaliny a na poměru, v jakém se proud kapaliny dělí do jednotlivých větví. Kapalina v rozvětvení se může pohybovat několika směry. Při každém směru pohybu má tlaková ztráta jinou velikost a víry v potrubí vznikají jinak.

Pokud se kapalina vstupuje ze strany do potrubí, jak nám ukazuje obrázek 16, je tlaková ztráta závislá na úhlu α , pod kterým je větev k potrubí připojena a na velikosti průřezu potrubí. Úhel je obvykle 30° , 45° , 60° a speciální případ 90° . Těmto rozvětvením se potom říká T rozvětvení a je doprovázeno silným vířením kapaliny.

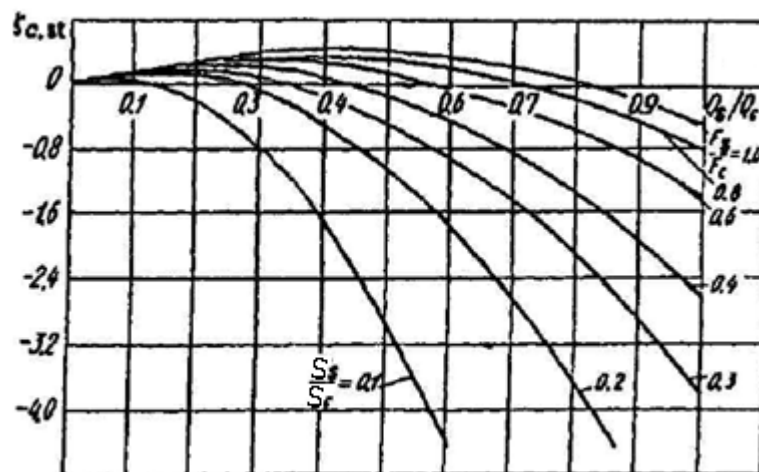


Obrázek 16 – Větev připojená ze strany [1]

Tlaková ztráta v tomto případě vzniká vytvořením víru za ostrou hranou, a také turbulencí spojenou s vyrovnáváním rychlostí w_{st} a w_s . Tlakové ztráty vypočteme z rovnice (22), ta vychází ze znalostí průtoků, které procházejí jednotlivými větvemi. Popřípadě je můžeme zjistit z grafu na obrázku 17. Tato rovnice i graf platí pouze pro úhel větvení 45° . Pro jiné úhly bychom museli použít příslušnou rovnici popřípadě příslušný graf.

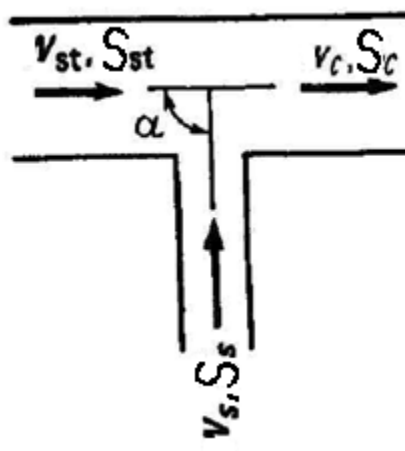
$$\zeta_{c,u} \equiv \frac{\Delta p_{st}}{\rho w_c^2 / 2} = 1 - \left(1 - \frac{Q_s}{Q_c}\right)^2 - 1.41 \frac{S_s}{S_c} \left(\frac{Q_s}{Q_c}\right)^2 \quad (22)$$

Abychom mohli zjistit tlakovou ztrátu z grafu, musíme znát poměr ploch mezi jednotlivými větvemi. Tento poměr ploch je v grafu popsán vztahem F_s/F_c .



Obrázek 17 – Ztrátový součinitel pro úhel 45° [1]

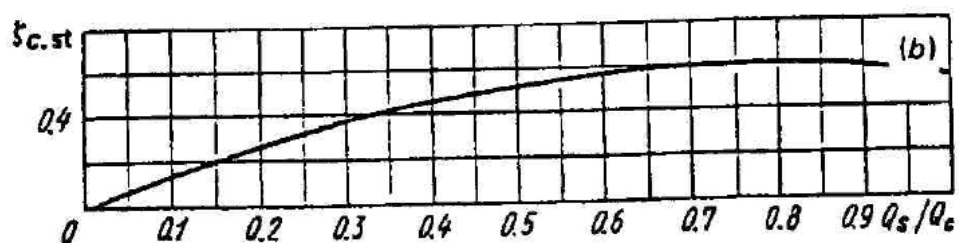
Speciálním případem je rozvětvení s úhlem 90°, nazývané T rozvětvení. Proudění se zde chová obdobným způsobem jako u ostatních rozvětvení, ale tlakové ztráty jsou zde výraznější vlivem velkého úhlu připojení. Velikost tlakových ztrát a chování kapaliny vůbec v T rozvětvení silně závisí na poměru, v jakém se kapalina vstupuje do potrubí. Na obrázku 18 je zobrazeno T rozvětvení s důležitými parametry, které jsou použity například při výpočtu tlakové ztráty.



Obrázek 18 – T větvení [1]

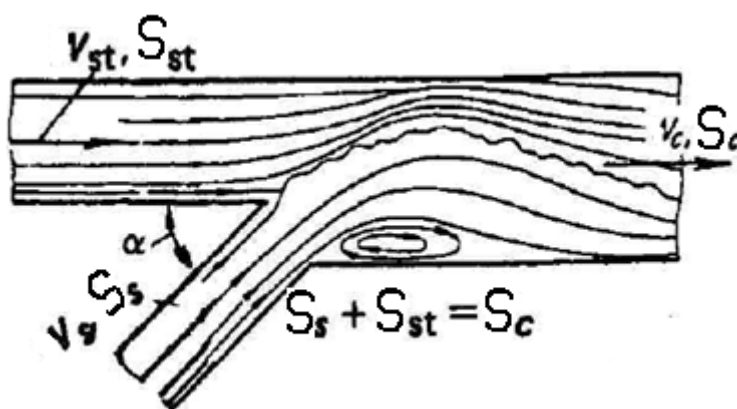
Tlakové ztráty v T rozvětvení se zjistí pomocí grafu na obrázku 19, popřípadě pomocí rovnice 23, která vychází ze znalosti velikosti průtoků ve větvích.

$$\zeta_{c,st} \equiv \frac{\Delta p_{st}}{\rho w_c^2 / 2} \approx 1.55 \frac{Q_s}{Q_c} - \left(\frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 \quad (23)$$



Obrázek 19 – Ztrátový součinitel v T rozvětvení [1]

Dalším způsobem, jak může kapalina do potrubí přitékat je, že velikost průřezu pokračujícího potrubí je rovna součtu velikostí průřezů připojených větví. Tento způsob připojení je zobrazen na obrázku 20 i s vykreslenými proudnicemi, které naznačují chování proudění v potrubí.

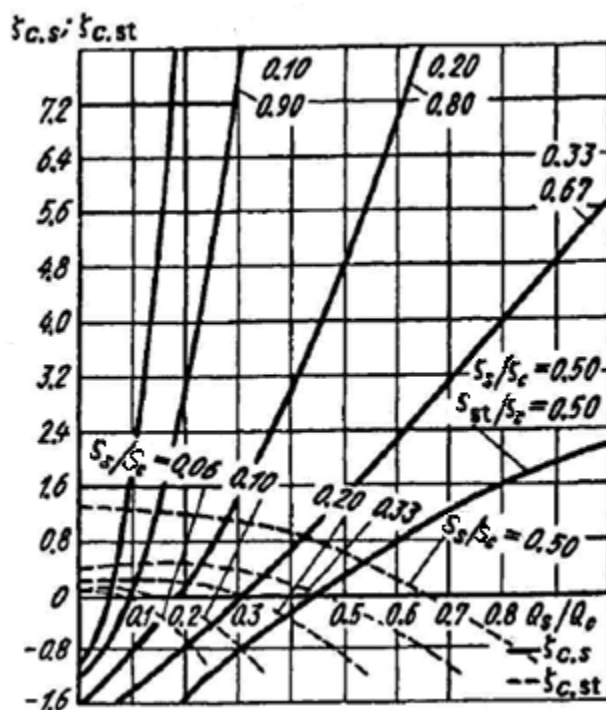


Obrázek 20 – Rozvětvení s větším průměrem [1]

Tlaková ztráta je ovlivněna velikostí úhlu připojené větve a obdobně jako u předchozího případu se úhel α pohybuje mezi hodnotami 15° , 30° , 45° , 60° a 90° . Pro příklad je níže uveden možnost výpočtu tlakových ztrát pro úhel připojení 45° . Ty můžeme zjistit pomocí grafu na obrázku 21 nebo z rovnice (24).

$$\zeta_{c, st} = \frac{\Delta p_u}{\rho w_c^2 / 2} = 1 + \left(\frac{S_c}{S_s} \right)^2 \left(1 - \frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 - 2 \frac{S_c}{S_u} \left(1 - \frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 - 1.41 \frac{S_c}{S_s} \left(\frac{Q_s}{Q_c} \right)^2 + K_u \quad (24)$$

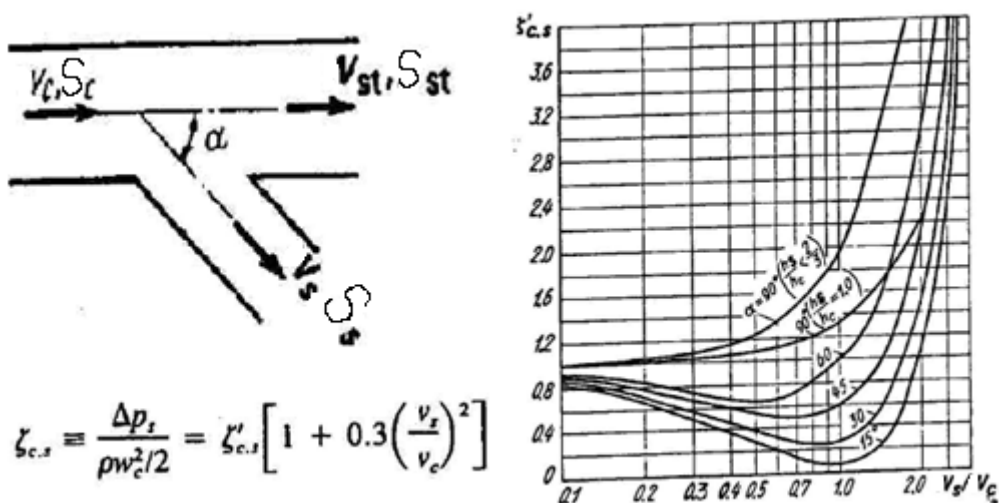
Z rovnice je patrné, že zjištění ztrátového součinitele nebude tak jednoduché a pro výpočet, musíme znát velikosti průtoků v jednotlivých větvích, a také velikosti průřezů potrubí.



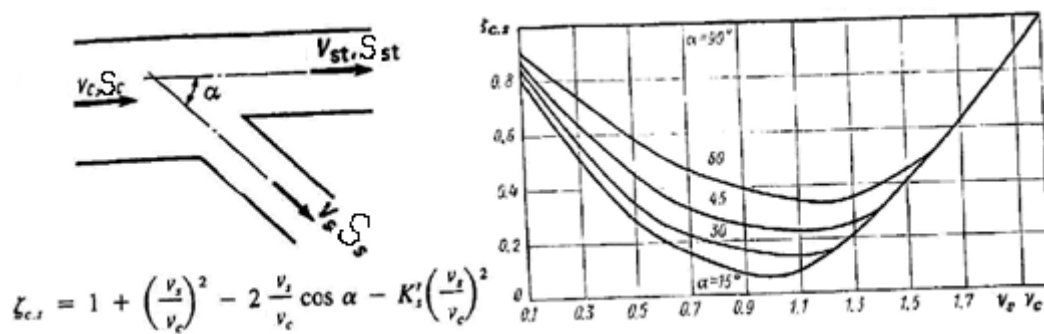
Obrázek 21 – Ztrátový součinitel v rozvětvení s úhlem 45° [1]

Velikost tlakových ztrát ve všech výše popsaných rozvětveních lze snížit například zaoblením hran popřípadě použitím difusoru ke snížení rychlosti proudění a tím zvýšení statického tlaku kapaliny.

Ve všech výše popsaných rozvětveních kapalina do potrubí přitékala, ne vždy tomu tak je. Pokud kapalina z rozvětvení vytéká, způsobuje rovněž tlakové ztráty. Tyto tlakové ztráty jsou závislé na úhlu, pod kterým se kapalina rozvětjuje a také na rychlostech, kterými se kapalina v potrubí pohybuje. Pro příklad jsou na obrázku 22 a 23 zpracovány rozvětvení s dělícím se průtokem a způsoby výpočtu ztrátového součinitele.



Obrázek 22 – Rozvětvení typ 1, způsob výpočtu [1]



Obrázek 23 – Rozvětvení typ 2, způsob výpočtu [1]

Obdobně jako to bylo u potrubí, které se sbíhá v jedno, tak i u rozvětvení, které dělí proud kapaliny lze zmírnit tlakové ztráty zaoblením hran nebo difuzorem otočeným tak, aby snižoval statický tlak kapaliny a naopak zvyšoval její rychlost.

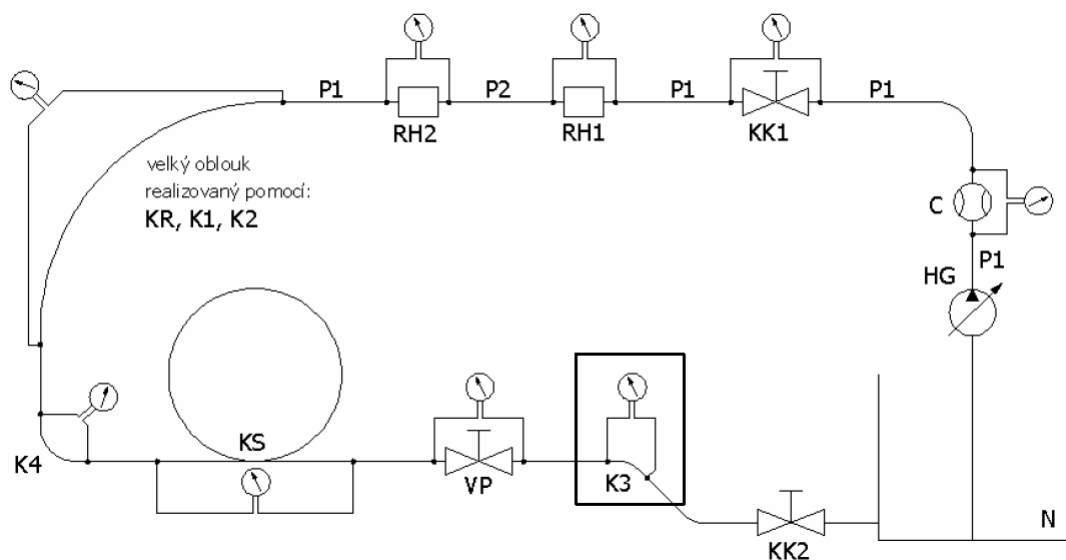
2 Měření ztrátového součinitele v koleni

Teoretické stanovení místní ztráty na prvku je velmi obtížné a nepřesné, proto jsme se rozhodli tento součinitel zjistit experimentálně. Pro měření jsme si vybrali koleno s úhlem 45° . Na konci měření stanovíme hodnotu ztrátového součinitele a jeho závislost na Reynoldsově čísle.

2.1 Popis měřicího obvodu a princip jeho funkce

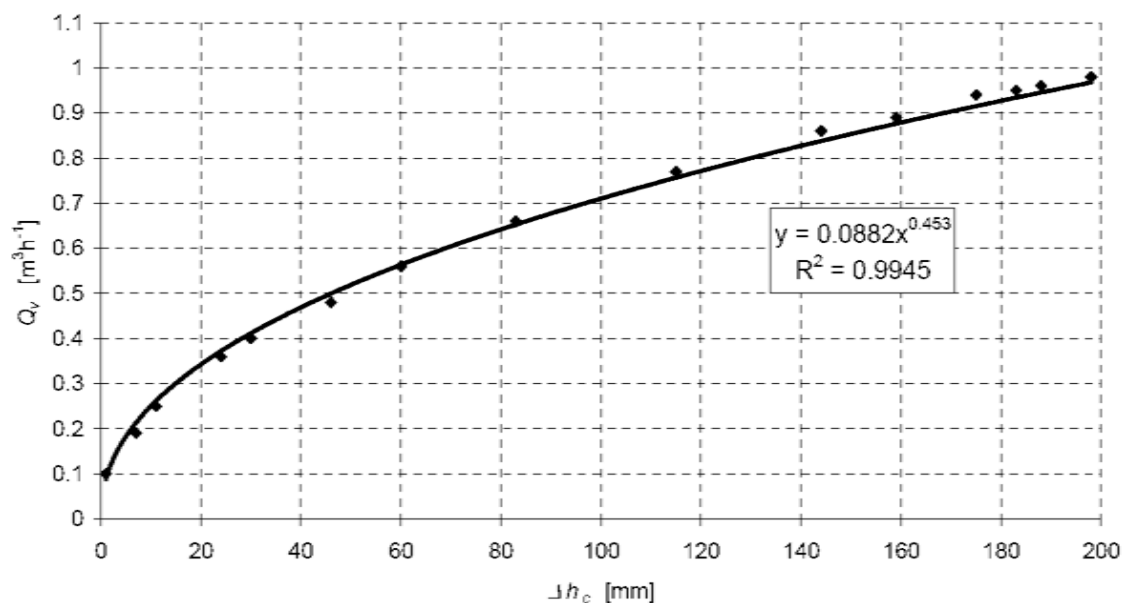
Na obrázku 24 se nachází schéma zkušebního obvodu, ve kterém je tučně označen prvek K3, což je naše měřené koleno 45° . Dále se v obvodu nachází cirkulační čerpadlo HG, nádrž N, clona C, potrubí P1 s vnitřním průměrem 18 [mm], potrubí P2 s vnitřním průměrem 14,4 [mm], kulový kohout KK1 a KK2, redukce hrdlová RH1 a RH2, koleno 45° K1, K2 a K3, koleno 90° K4, kompenzační smyčka KS a ventil přímý VP.

Cirkulační čerpadlo nasává vodu z nádrže a vhání ji dále do systému. V něm se nacházejí prvky, na nichž chceme zjišťovat tlakové ztráty. Ty zjišťujeme pomocí rozdílů tlaků před a za prvkem, pomocí U-trubic připojených na odběrná místa. Voda se po projití obvodu vrací zpět do nádrže.



Obrázek 24 - Schéma zkušebního obvodu [6]

Pro měření rychlosti se v obvodu používá clona. Abychom mohli clonu použít, musíme nejprve znát její tzv. cejchovní křivku, viz obrázek 25, pomocí které lze určit průtok ze ztrátové výšky na cloně.

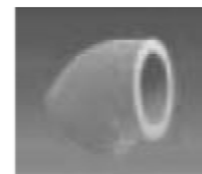
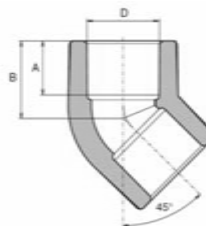


Obrázek 25 – Cejchovní křivka clony [6]

Pro výpočet tlakové ztráty na kolenní budeme muset zjistit specifikaci kolene. Ta se nachází na obrázku 26.

Koleno 45° (K1, K2, K3)

Typ: SKO02545XX
 Vnitřní průměr: 18 mm
 Výrobce: WAVIN Ekoplastik, s.r.o.



Obrázek 26 – Specifikace měřeného kolena K3 [6]

2.2 Postup měření a výpočtu

Hadičky U-trubic jsou připojeny na odběr tlaku před a za měřeným prvkem a také před a za clonou. Spustíme čerpadlo a otevřeme všechny kohouty na plný průtok. Odečteme rozdíly výšek hladin na U-trubici připojené k měřenému prvku (dále označováno jako Δh_p) a rovněž odečteme rozdíl hladin na U-trubici připojené k cloně (dále označováno jako Δh_c) a mírně přivřeme kohout KK2. Tento postup zopakujeme desetkrát, až do úplného uzavření kohoutu KK2. Naměřené hodnoty zpracujeme do tabulky a vypočteme ztrátový součinitel pro každé přivření kohoutu KK2.

Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

| | Měřené veličiny | | Počítané veličiny | | | | |
|--------|----------------------|----------------------|----------------------|---|-----------------------------|-----------|--------------|
| Měření | Δh_c [mm] | Δh_p [mm] | Δp_p [Pa] | Q_v [m ³ ·h ⁻¹] | v [m·s ⁻¹] | Re [1] | ξ [1] |
| 1 | 194 | 111 | 1088,91 | 0,959053 | 1,047431 | 18657,86 | 1,985047 |
| 2 | 182 | 102 | 1000,62 | 0,93171 | 1,017569 | 18125,92 | 1,932732 |
| 3 | 163 | 90 | 882,9 | 0,886318 | 0,967993 | 17242,83 | 1,884502 |
| 4 | 120 | 72 | 706,32 | 0,771503 | 0,842598 | 15009,17 | 1,989713 |
| 5 | 91 | 55 | 539,55 | 0,680635 | 0,743357 | 13241,38 | 1,952843 |
| 6 | 72 | 41 | 402,21 | 0,612125 | 0,668533 | 11908,56 | 1,799852 |
| 7 | 48 | 36 | 353,16 | 0,509414 | 0,556357 | 9910,37 | 2,281887 |
| 8 | 18 | 14 | 137,34 | 0,326668 | 0,356771 | 6355,154 | 2,157979 |
| 9 | 9 | 7 | 68,67 | 0,182853 | 0,199703 | 3557,304 | 3,443716 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | - |

Postup výpočtu pro první řádek:

Tlaková ztráta:

- hustota vody $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$\Delta p_p = \rho \cdot g \cdot \Delta h_p = 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,111 = 1088,91 \text{ Pa}$$

Průtok potrubím:

- průtok počítáme pomocí cejchovní křivky clony, respektive z rovnice regresní křivky

$$Q_v = f(\Delta h_c) = 0,0882 \cdot \Delta h_c^{0,453} = 0,0882 \cdot 194^{0,453} = 0,959053 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Rychlost proudění tekutiny v potrubí:

- vnitřní průměr kolena $d = 18 \text{ mm}$

$$v = \frac{4 \cdot Q_v}{\pi \cdot d^2} \div 600 = \frac{4 \cdot 0,959053}{\pi \cdot 0,018^2} \div 600 = 1,047431 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Reynoldsovo číslo:

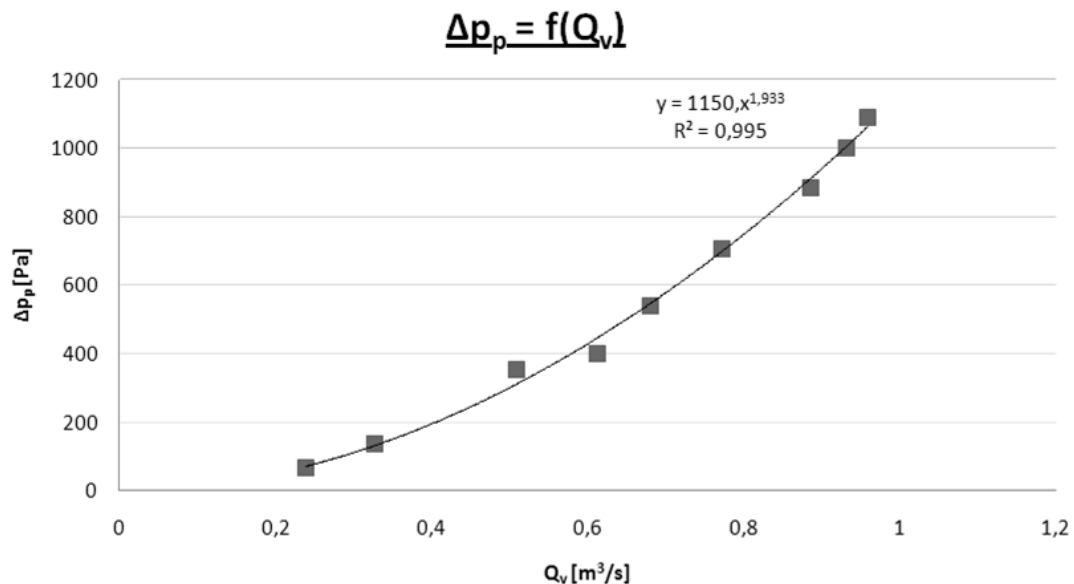
- viskozita pro vodu při teplotě 20°C je $1,0105 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,047431 \cdot 0,018}{1,0105 \cdot 10^{-6}} = 18657,86 \Rightarrow \text{turbulentní proudění}$$

Ztrátový součinitel:

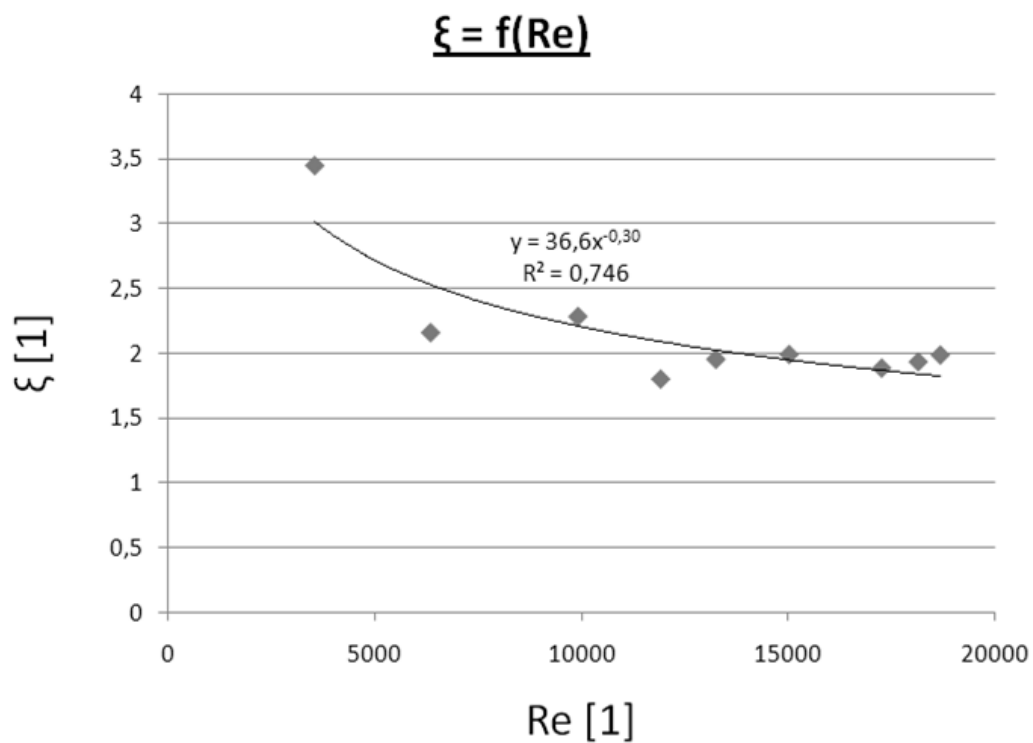
$$\xi = \frac{2 \cdot \Delta h_p \cdot g}{v^2} = \frac{2 \cdot 0,111 \cdot 9,81}{1,047431^2} = 0,985047$$

Graf závislosti tlakové ztráty na průtoku



Na grafu výše je znázorněna závislost tlakové ztráty na průtoku procházející obvodem. Z naměřených hodnot vyplývá, že tlaková ztráta roste s rostoucím průtokem mocninnou funkcí.

Graf závislosti ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle



Na grafu výše je znázorněna závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle. Z naměřených hodnot vyplývá, že se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem se snižuje ztrátový součinitel. Při $Re > 10000$ se ztrátový součinitel pohybuje mezi hodnotami 1,8 -2.

2.3 Vyhodnocení měření

Pro lepší přehlednost jsou zpracovaných data zpracovaná do dvou grafů. V grafu závislosti tlakové ztráty na průtoku můžeme vidět, že se snižujícím se objemovým průtokem se snižuje i tlaková ztráta na prvku. Z grafu závislosti ztrátového součinitele je patrné, že se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem se snižuje ztrátový součinitel ζ .

Závěr

V práci se rozebírá problematika hydraulických odporů, jejich rozdělení na ztráty třecí a místní s popisem výpočtu. Detailněji se věnuje místním ztrátám v různých hydraulických prvcích, konkrétněji v kolenech a rozvětveních. Popisuje chování kapaliny v těchto prvcích a možnosti výpočtu ztrátového součinitele. Dále v práci najdeme možnosti, jak snížit tyto hydraulické ztráty.

V druhé části je provedeno měření místní ztráty v koleni s úhlem 45° a vyhodnocení tohoto měření do dvou grafů, které ukazují, že tlaková ztráta roste s rostoucím průtokem mocninnou funkcí, a že se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem se snižuje ztrátový součinitel. Při $Re > 10000$ se ztrátový součinitel pohybuje mezi hodnotami 1,8 -2.

Seznam použité literatury

- [1] IDELCHIK, I. E.: *Handbook of Hydraulic Resistance*. CRC Press, Inc. 1994. ISBN 1-56700-074-6.
- [2] JANALÍK, J., ŠTÁVA, P.: *Mechanika tekutin*. VŠB-TU Ostrava, 2002
- [3] DRÁBKOVÁ, S.: *Mechanika tekutin*. VŠB-TU Ostrava, 2007
- [4] KOZUBKOVÁ, M., DRÁBKOVÁ, S.: *Cvičení s Mechaniky tekutin*. Sb. příkladů. VŠB-TU Ostrava, 2002
- [5] RAUTOVÁ, J.: *Potrubní systémy a armatury část 3*. VŠB-TU Ostrava, 2011
- [6] KOZUBKOVÁ, M. a kolektiv.: *Návody pro laboratorní měření z mechaniky tekutin*. VŠB-TU Ostrava, 2007

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1 - Rozdělení drsností [2] | 12 |
| Obrázek 2 - Nikuradseho diagram [5] | 12 |
| Obrázek 3 – Zúžení průřezu potrubí [2] | 13 |
| Obrázek 4 - Turbulence za rozšířením [1] | 14 |
| Obrázek 5 - Rozšíření průřezu potrubí [2] | 14 |
| Obrázek 6 – Ztrátový součinitel v náhlém rozšíření[5] | 15 |
| Obrázek 7 – Difuzor [2] | 15 |
| Obrázek 8 - Proudění v difuzoru [1] | 16 |
| Obrázek 9 – Ztrátový součinitel v difuzoru[5] | 17 |
| Obrázek 10 – Rychlostní profil v kolenu [2] | 17 |
| Obrázek 11 - Proudění v kolenu [2] | 18 |
| Obrázek 12 – Ztrátový součinitel při proudění v kolenu [5] | 19 |
| Obrázek 13 – Proudění na cloně [1] | 19 |
| Obrázek 14 – Zaoblená clona [1] | 20 |
| Obrázek 15 – Graf ztrát na cloně [1] | 20 |
| Obrázek 16 – Větev připojená ze strany [1] | 21 |
| Obrázek 17 – Ztrátový součinitel pro úhel 45°[1] | 22 |
| Obrázek 18 – T větvení [1] | 22 |
| Obrázek 19 – Ztrátový součinitel v T rozvětvení [1] | 23 |
| Obrázek 20 – Rozvětvení s větším průměrem [1] | 23 |
| Obrázek 21 – Ztrátový součinitel v rozvětvení s úhlem 45°[1] | 24 |
| Obrázek 22 – Rozvětvení typ 1, způsob výpočtu [1] | 24 |
| Obrázek 23 – Rozvětvení typ 2, způsob výpočtu [1] | 25 |
| Obrázek 24 - Schéma zkušebního obvodu [6] | 26 |
| Obrázek 25 – Cejchovní křivka clony [6] | 27 |
| Obrázek 26 – Specifikace měřeného kolena K3 [6] | 27 |